Physique de l'état solide
PHY-3003

Département de Physique, de Génie Physique et d'Optique
Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval

Hiver 2025 Responsable : C. Allen

Exposé & Examen Oral

Le cours de Physique de l'état solide introduit à la vaste discipline de la matière condensée et ce travail de recherche progressif pendant la session, culminant avec un exposé et un examen oral, permet d'explorer un sujet plus spécialisé. Une liste d'exemples de sujets est proposée en annexe, à laquelle s'ajoute les chapitres du manuel de cours qui ne seront pas couverts en classe. Tout autre sujet de matière condensée qui vous intéresse peut aussi être accepté sous réserve de satisfaire les conditions spécifiées après les étapes d'exécution à la fin ; n'hésitez pas à discuter de nouveaux sujets sur le *Teams* du cours.

Plus généralement, ce travail de recherche permet aussi au (à la) jeune professionnel(le), indépendamment de son choix de discipline future, de se former à la revue de littérature scientifique, à l'apprentissage autonome et à la communication. Bien que les ressources informatiques semblent *a priori* faciliter la recherche documentaire avec un accès rapide et vaste au bout des doigts, paradoxalement l'explosion contemporaine des sources d'information à qualité variable peut rendre plus ardu de trouver des articles scientifiques et documents de vulgarisation à la fois pertinents et rigoureux. La recherche de littérature doit donc se faire avec un discernement assisté par les conseils de la section suivante, mais en reposant ultimement sur votre jugement critique.

La communication de cette recherche quant à elle devrait toujours s'ajuster en fonction de l'auditoire et du contexte ; il faut chercher une balance entre vulgarisation et profondeur scientifique/technique dans son exposé. L'évaluation de ce dernier reposera donc sur les critères suivants, aussi indiqués dans l'évaluation correspondante sur le site de cours :

— accessibilité et vulgarisation,
— rigueur et profondeur du contenu,
— communication verbale,
— réponse aux questions après l'exposé.

Méthodologie de la recherche

Après avoir formé une équipe de recherche de **deux personnes**, le coeur du travail est de trouver et maîtriser la littérature scientifique pertinente à son sujet de présentation. Toute communication scientifique allant de la présentation en conférence à la thèse doit d'abord se préparer sur un contenu étoffé bien compris pour transmettre son savoir clairement. Voici quelques pistes de départ pour vous aider à vous documenter sur votre sujet :

— Le moteur de recherche Google est évidemment un incontournable, mais la version plus spécialisée https://scholar.google.com et les moteurs de recherche de collections propres à une discipline, par exemple les bases de données disponibles à la bibliothèque https://www.bibl.ulaval.ca/web/physique-optique/articles#contenu, devraient proposer plus de résultats pertinents.

— Un article pertinent est souvent lui-même un bon filon pour en trouver plusieurs autres, notamment via les citations listées en référence à la fin de l'article. De plus, des articles reliés ou plus récents qui citent ledit article pertinent en référence sont accessibles via des liens dans les bases de données (notamment `Cited by #` ou `Related articles` sur https://scholar.google.com). Autrefois, dans une ère pré-internet(!), ce filon d'article devait entre cherché en utilisant les noms d'auteurs comme mots-clefs, où les derniers auteurs sont souvent les directeurs de laboratoire. Cette méthode est certainement encore actuelle et utile pour suivre tout auteur dont le style de communication vous rejoint.

— Les articles de revue et les articles de fond exhaustifs sont souvent les plus utiles pour s'initier à un nouveau sujet, mais apparaissent rarement en premier dans le tri en ordre de popularité des algorithmes de recherche. Des exemples de journaux publiant des revues en physique sont *Reviews of Modern Physics*, *Review of Scientific Instruments*, et plusieurs *Annual Reviews*. Les journaux publiant des articles de fond spécialisés sont plus difficiles à dénicher et vous devriez les découvrir progressivement dans votre carrière, possiblement via les publications des associations scientifiques de votre future discipline. Par exemple, la communauté des physiciens et ingénieurs en croissance épitaxiale cristalline publie souvent dans le *Journal of Vacuum Science & Technology* de la société professionnelle AVS.

— Plusieurs thèses sont même encore plus utiles que des articles puisque le sujet y est traité beaucoup plus en profondeur. Le défi est de trouver les meilleures thèses pour éviter d'accumuler tellement de texte au point de devenir impossible à lire exhaustivement. Il peut alors être bon de débuter sa revue de littérature par des articles pour découvrir les groupes de recherche les plus pertinents et ensuite aller chercher les thèses des étudiants dans ces groupes. En plus des pages web avec outils de recherche dans les bibliothèques universitaires [1], le moteur de recherche ciblé WorldCat est fort utile pour trouver des thèses.

— Les publications en libre accès sont de plus en plus communes, certaines plateformes permettant même le partage gratuit des manuscrits dans le respect des droits d'auteur appartenant souvent aux maisons d'édition [2]. La diffusion libre des connaissances est pratiquée depuis longtemps dans la recherche en physique, donnant lieu à la création d'une version électronique de dépôt de manuscrits dès 1991 par Paul Ginsparg à l'Université Cornell sur le site arXiv.org. L'Université Laval valorise aussi la diffusion de la recherche en libre accès : https://www.bibl.ulaval.ca/services/libre-acces.

— Les dictionnaires et encyclopédies sont toujours d'excellents outils pour trouver les définitions du vocabulaire technique, même s'ils ne peuvent **pas être cités** comme sources originales. Au-delà de Wikipédia, d'autres ressources sont listées ici https://www.bibl.ulaval.ca/

1. Par exemple, Sofia à l'Université Laval.

2. Les plus récentes informations légales applicables se consultent via les liens du site Internet de chaque journal scientifique. La ressource électronique en ligne SHERPA/RoMEO tente toutefois de regrouper les politiques d'archivage et diffusion en libre accès de manière plus conviviale à consulter.

web/physique-optique/dictionnaires-et-encyclopedies#contenu auxquelles s'ajoutent le Grand Dictionnaire Terminologique (GDT), TERMIUM Plus®, *IUPAC Gold book*, etc.

— En ce qui concerne la thématique de notre cours sur les matériaux à l'état solide, et plus généralement la matière condensée, une surprenante difficulté est de trouver des résultat de mesures expérimentales fidèles pour toute propriété ou grandeur physique des solides. Vous verrez bien quelques tableaux dans le manuel du cours, mais ils se limitent aux données caractéristiques de cristaux simples. Toutefois, une ressource impressionnante de propriétés matérielles, comparant même parfois les résultats de mesure de plusieurs chercheurs, est le groupe III de la collection Landolt-Börnstein. La maison d'édition Springer accroît continuellement ce travail, élargissant aussi sa portée notamment grâce aux bases de données accessibles via le site Web SpringerMaterials. Si ces hyperliens ne fonctionnent pas, veuillez suivre celui correspondant sur la page Web https://www.bibl.ulaval.ca/web/physique-optique/presentation#contenu de notre bibliothèque pour y avoir accès via la souscription de l'Université Laval.

— Finalement, notre bibliothèque propose des mots-clefs pour en apprendre plus sur la méthodologie de la recherche en tout domaine : https://www.bibl.ulaval.ca/chercher-autres-sujets/methodologie-de-la-recherche.

Consignes bibliographiques La sélection rigoureuse des sources originales de votre documentation étant essentielle pour appuyer la qualité scientifique de vos communications, l'auditoire doit pouvoir se référer à celles-ci à l'aide d'une bibliographie, ou plus généralement d'une médiagraphie, qui lui permettra de nourrir son propre processus de questionnement critique. Puisque toute publication s'inscrit dans un grand *corpus* de littérature scientifique en constante évolution et révision *(aka peer review)*, la bibliographie doit aider à placer le contexte où elle se situe et les citations qui en sont faites supportent les énoncés provenant d'une réflexion profonde et correcte tout en évitant les déclarations sommaires sans validation détaillée.

Vous devez donc préparer une bibliographie de 10 références des sources documentaires qui serviront à préparer votre exposé. Afin d'assurer la diversité et la portée de votre recherche de littérature, avec une perspective aussi large que possible couvrant idéalement le cheminement historique de votre sujet de recherche, chacun des items suivants sont exigés au moins une fois dans votre bibliographie :

— la plus récente publication en génie ou en science,

— la plus vieille publication en science ou en génie,

— un article technique et/ou scientifique,

— un livre,

— un document de vulgarisation ou pédagogique dans le format de votre choix, pouvant aussi être un site Internet.

La compilation des références lors de votre recherche de littérature peut être facilitée par des outils informatiques de gestion bibliographique tels que le logiciel libre Zotero.

Étapes d'exécution : pondération & dates de remise

1. Choix du sujet de la présentation et création des équipes, janvier 2025 ..... 1%
2. Bibliographie, février 2025 ..... 3%
3. Exposés présentés en classe selon le calendrier à venir 7%
4. Questions proposées pour l'examen oral, avril 2025 ..... 2%
5. Examen oral individuel, plage à réserver pendant la semaine d'examens 12%

Le sujet de matière condensée choisi à l'étape 1 **ne doit PAS** être déjà directement enseigné dans vos cours de baccalauréat et, si vous avez profité de stages ou projets reliés aux matériaux, il doit se démarquer significativement de ces travaux. Pour que les présentations soient toutes différentes, les sujets ne doivent pas être dupliqués *(Premier arrivé, premier servi !)*, d'où veuillez surveiller la liste des soumissions antérieures à la vôtre à cette adresse URL (à venir sous peu). L'étape suivante `2.Bibliographie` est de colliger une bibliographie de 10 articles et/ou livres scientifiques, comprenant les items indiqués dans la section **Consignes bibliographiques**, qui serviront de base à votre exposé. Il n'est évidemment pas nécessaire de se limiter à ces 10 références pour la suite du travail. Le calendrier de vos exposés de 15 minutes AU MAXIMUM ainsi qu'une explication plus détaillée du *modus operandi* de l'examen oral selon les questions proposées sera donnée dans les documents subséquents sur le site Internet du cours. Notez que ces deux dernières étapes seront évaluées individuellement. La remise de ces deux premières étapes se fait sur les pages Web ci-dessous :

— `1. Sujet & formation de l'équipe` https://airtable.com/shrsEwrfG6OcpF3F9
— `2. Bibliographie` https://airtable.com/shrq84htaEHtG1ic8

Annexe : Exemples de sujets

Sources	Exemples
Livres et pages Wikipédia en caractérisation de matériaux	Microscopie à effet tunnel : *STM* Microscopie à force atomique : *AFM* Tout autre microscopie à sonde locale : *EFM, NSOM, KPFM, BEEM, CFM* Microscopie et/ou spectroscopie de cathodoluminescence Corrélation angulaire de la radiation d'annihilation électron-positron : *ACAR* Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire : *RMN* Spectroscopie d'absorption des rayons X : *XAS, XANES, EXAFS* Spectroscopie d'émission des rayons X : *XES, PIXE, XRF* Analyse dispersive spectralement de rayons X : *EDS, WDS* Microscopie, tomographie, holographie électronique : *SEM, TEM, HRTEM, STEM, SAED* Analyse élémentaire en microscopie électronique : *EELS, EDX, RHEELS* Diffusion élastique et/ou inélastique des neutrons Spectroscopie électronique Auger : *AES, XAES* Spectroscopie Raman : *RS, RR, RIXS* Synchrotron comme source de radiations pour la caractérisation de matériaux
Livres *The Physics of Low-Dimensional Semiconductors* par J. H. Davies et *Opto-électronique* par E. Rosencher et B. Vinter	Effet Hall quantique Transport cohérent d'électrons Équation de Boltzmann et autres équations de transport électronique Modèle $\vec{k} \cdot \vec{p}$ de Kane Approximation Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) aussi appelée méthode Liouville-Green (LG) Processus Auger : ionisation d'impact, recombinaison Absorption par porteurs libres dans les semiconducteurs Piézoélectricité Effets de surface : liaisons pendantes, états de surface, travail de sortie et affinité électronique, modèles de Schottky et Bardeen, etc. Diode de Schottky : jonction métal-semiconducteur Photodiode Schottky à émission interne Diodes électroluminescentes (DEL) et laser Électromodulateur à effet Franz-Keldysh Détecteur et cellule photovoltaïque Électrons chauds Photodiode à avalanche Gaz bidimensionnel d'électrons (2DEG) Hétérostructures semiconductrices Semiconducteurs à confinement quantique : points, fils et puits Effet Stark confiné quantiquement
	Isolants topologiques Théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT)

	Semi-métaux de Weyl et Dirac Pérovskites Polymères Oxydes ferroïques Supraconductivité Supraconducteurs à haute température : cuprates, pnictures de fer, la saga LK-99, etc. Matériaux 2D tels le graphène Systèmes vitreux et désordonnés Chaînes de spin Systèmes frustrés de spin Verres et glaces de spin Spintronique Systèmes d'électrons corrélés Effets de proximité Aimants chiraux Magnétotransport et oscillations quantiques Transition métal-isolant Acoustique quantique Thermoélectricité Matériaux sous pression Électronique organique
Varia	Jonction de Josephson Jonction van der Waals Twistronique Modulateur acousto-optique Phase géométrique de Berry Localisation d'Anderson Polymères conducteurs, semiconducteurs et supraconducteurs Transistor à effet de champ (EXCLUANT les jonctions bipolaires) Défauts cristallins : ponctuels, lacunes, atomes interstitiels, dislocations, joints de grains, joints de phases, joints de macle, défauts d'empilement, parois d'antiphase, pores, précipités, macles, inclusions, etc. Toute phase de la matière condensée au-delà du cristal : verres, quasicristaux, liquides, cristaux liquides, cristaux plastiques, solutions solides, condensats de Bose-Einstein, dropletons, superfluides, etc. Tout nanomatériau Tout métamatériau Méthodes de croissance de cristaux : *MBE, CVD, MOCVD,* synthèse colloïdale Méthodes de déposition de matériaux : ablation par laser pulsé, *CVD, ALD, PVD :* évaporation sous vide, pulvérisation cathodique (*sputtering*) Superfluidité Effet Aharonov-Bohm Effet Shubnikov-De Haas

Effet De Haas-van Alphen
Niveaux de Landau
Excitons
Réseau optique : atomes refroidis piégés périodiquement par laser

Table 1 – Exemples de sujets pour l'exposé avec leurs sources qui peuvent être consultées pour encore plus de choix !